

대심도 지하관로 배수 시스템의 서어징 현상에 관한 연구

정 광 근* / 안 태 진**

1. 서론

최근, 도시화에 의해 홍수의 피해가 증가하고 있다. 그 대책으로서 지하공간을 이용하는 대심도 지하관로 배수 시스템의 건설을 일본의 토우쿄도, 오오사카부, 사이타마현 그리고 미국의 미시간호 유역 등에서 하고 있다. 본 연구에서는 (그림 1)과 같이 사이타마현 나카가와유역의 지하관로 배수 시스템을 모델로 해서 홍수의 유입시에 발생하는 각 수조내의 서어징 현상을 연성진동의 견지에서 검토를 행하였다. 특히 스케가와 등의 연구에서는 각 수조수위가 U자관 진동으로서의 근이적인 검토에 그친 것에 반하여 본 연구에서는 강제수주이론의 이점인 선형근이에 의한 고유주기, 고우모드에 관하여 해석을 행하고 지하관로 배수 시스템이 비정상상태에서의 배수능력을 고찰하였다.

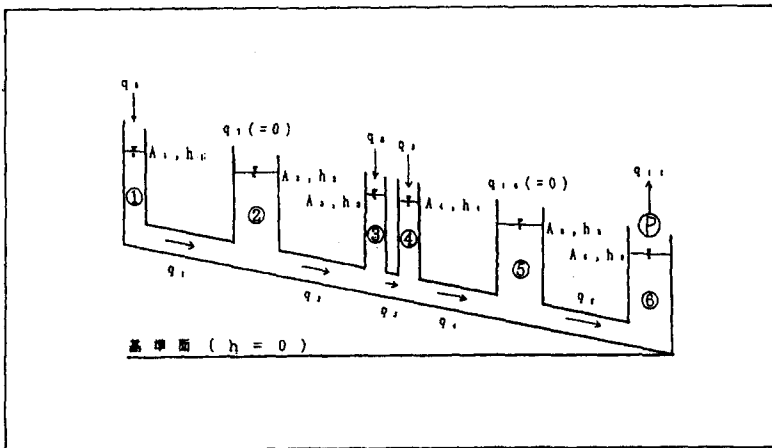


그림 1 대심도 지하관로 배수 시스템

* 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원

** 한경대학교 토목공학과 조교수

2. 본론

비선형계로서의 각 수조수위와 관로유량의 변동치를 구하는 식을 매트릭스와 행렬을 이용하여 나타내면 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \\ \dot{h}_5 \\ \dot{h}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{A_2} & -\frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_3} & -\frac{1}{A_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & -\frac{1}{A_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_5} & -\frac{1}{A_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{A_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_6 \\ q_7 \\ q_8 \\ q_9 \\ q_{10} \\ -q_{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{K_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_3}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_4}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_5}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{pmatrix} \quad (2)$$

또한 선형계로서의 각수조수위와 관로유량의 변동치를 구하는 식을 매트릭스와 행렬을 이용하여 나타내면 다음과 같아진다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{A_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{A_2} & -\frac{1}{A_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_3} & -\frac{1}{A_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A_4} & -\frac{1}{A_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_5} & -\frac{1}{A_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{A_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \\ \dot{y}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_4} & -\frac{1}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_5} & -\frac{1}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_4}{L_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_5}{L_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (4)$$

그리고 비선형계의 상태방정식으로부터 구한 수위에 관한 2차 시간미분식에서 고유치 · 고유벡터 · 고유진동수의 계산을 행하며 저항을 무시한 자유진동의 해석에

관한 식은 이하와 같다.

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{pmatrix} = (\alpha_1 \cos \omega_1 t + \beta_1 \sin \omega_1 t) \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{31} \\ x_{41} \\ x_{51} \\ x_{61} \end{pmatrix} + \dots + (\alpha_5 \cos \omega_5 t + \beta_5 \sin \omega_5 t) \begin{pmatrix} x_{15} \\ x_{25} \\ x_{35} \\ x_{45} \\ x_{55} \\ x_{65} \end{pmatrix} + \alpha_6 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

3. 비교고찰

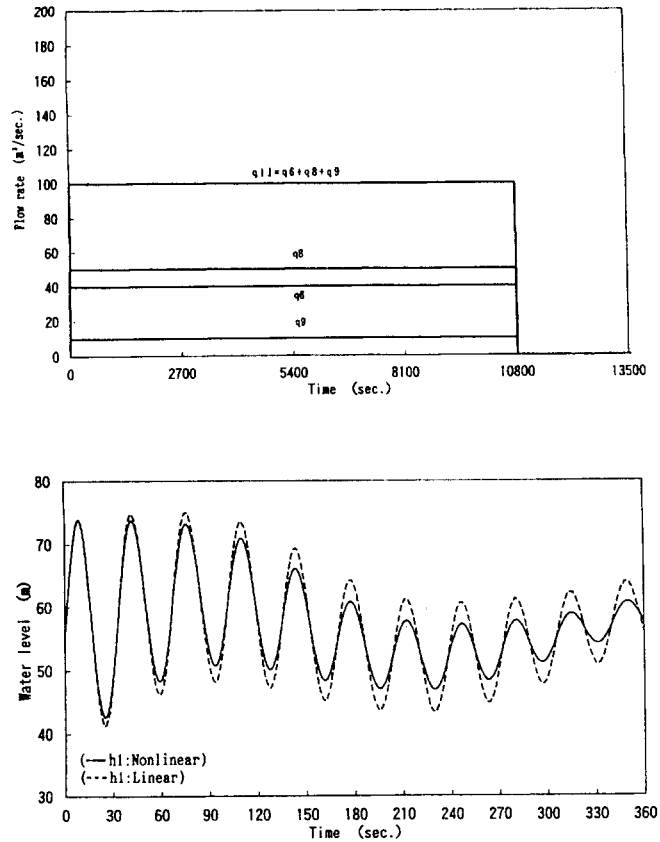


그림 2 비선형계와 선형계의 비교(장방형 펄스상의 유입, 유출에 의한 해석)

(그림 2)에서는 급격한 장방형 펄스상의 유입 및 유출을 행하여 비선형계와 선형 근이계를 비교한 시뮬레이션이다. 그 결과 이 시스템은 저항이 적기 때문에 최초의 어느 시간대까지는 비선형계와 선형근이계가 잘 일치한다. 또한 진폭이 작고 진동주기가 긴 수위에서는 비선형계와 선형근이계와의 차이는 별로 보이질 않는다.

저항을 무시한 수위의 2차 시간미분식을 이용해서 계산한 고유치 · 고유진동수 · 고유주기를 (표 1)에 나타내었다.

표 1 시스템(그림 1)의 자유진동해석에 의한 고유치 · 각진동수 · 고유주기

모드	고유치 ω^2	각진동수 $\omega^2 (S^{-1})^*$	고유주기 T(S)
1	-47.69684244	6.906290063	0.909316
2	-0.05425681	0.232930913	26.960784
3	-0.03418715	0.184897674	33.964732
4	-0.00181746	0.042631678	147.308299
5	-0.00041771	0.020437955	307.271448
6	0.00000000	0.000000000	무 한 대

* ω 는 허수부이지만 허수단위는 생략한다.

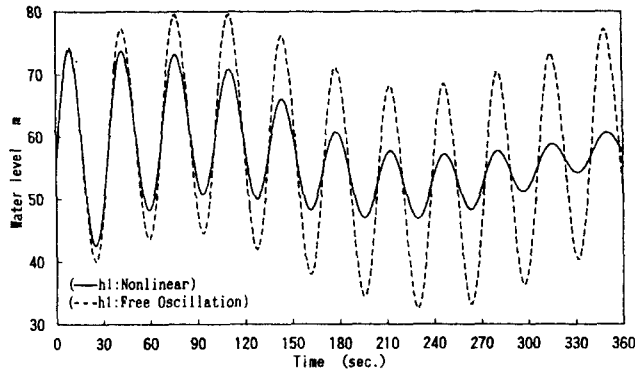


그림 3 장방형 펄스상의 유입, 유출에 의한 수치해석과 자유진동 해석의 비교

(그림 3)에서는 (그림 2)와 같은 조건하에서 행한 시뮬레이션을 이용해서 비선형계와 자유진동의 해석을 비교하였다. 그 결과 어느 시간대까지는 수위의 진폭도 잘 일치되며 진동주기도 일치하고 있다. 단, 자유진동의 해석에서는 저항을 무시하였기 때문에 진동이 수렴되지 않고 같은 진동을 반복하는 것을 알 수 있다.

(그림 4)에서는 전유입량과 같은 유출량을 상정하여 유입 및 유출을 SIN 파형으로 행한다. 그 결과 각 수위는 작은 진폭과 단순한 진동을 보이고 있다. 시스템의 안전한 설계라는 측면에서는 (그림 2)와 같은 장방형 펄스상의 유입, 유출이 바람

직하다.

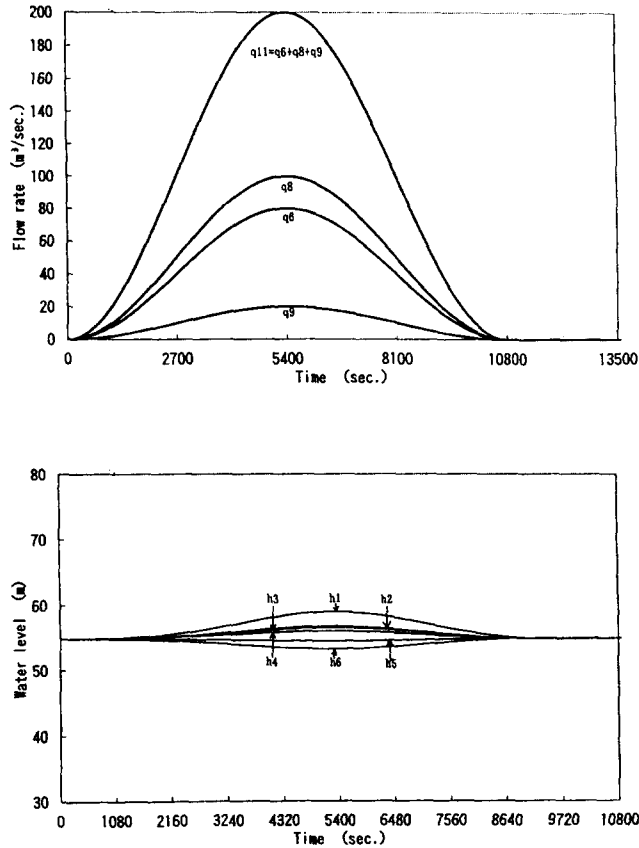


그림 4 SIN파의 유입, 유출에 의한 비선형계의 수치해석

(그림 5)에서는 고유벡터에 의한 고유모드를 나타낸 것으로서 각 고유주기에 대한 수조의 움직임을 알 수 있다. 이 결과 진동이 가장 급격한 수조①에 영향을 미치는 고유주기는 약 34초인 것을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) 고유진동의 해석에서는 장방형 펄스상의 유입, 유출을 이용하는 것이 가장 적당하다.
- (2) 관로의 저항을 무시한 고유진동의 해석에서 각 수조수위의 변동을 잘 이해할 수 있다.

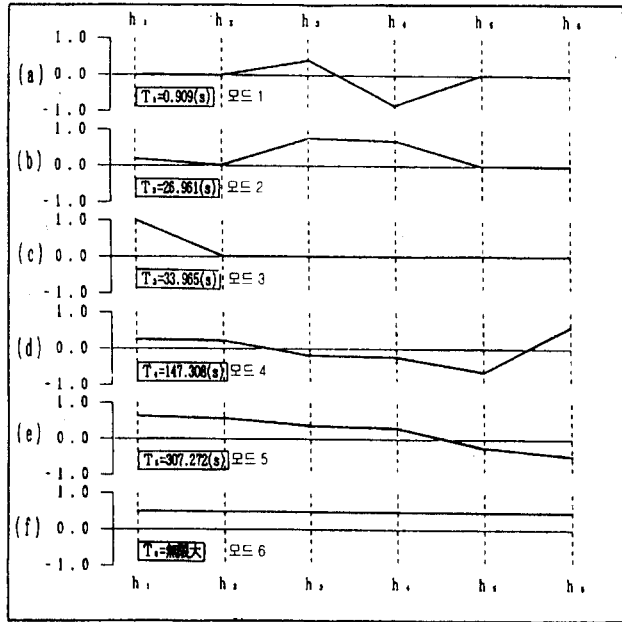


그림 5 각 고유주기에 대한 고유모드

5. 참고문헌

鬼塚宏太郎(1986). “狀態空間解析による枝わかれ管路の減衰特性の評価”. 土論集, Vol. 62, No. 2, pp. 79-89.

Onizuka K.(1986). “System dynamics approach to pipe network anlysis”. Trans. of the ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 728-749.

스케가와 노ボル(1996). “地下放水路の管水路状態の非定常流の数値計算.” 土論集, No. 545/II-36, pp. 55-67.